

2009

geoviden

GEOLOGI OG GEOGRAFI NR. 2

KLIMAÆNDRINGER

- Fremtidens vandressourcer i Danmark
- Effekter af fortidige klimaændringer
– mulige scenarier for fremtiden

FREMTIDENS VAND-RESSOURCER I DANMARK

Danmarks vandressourcer udgøres primært af grundvand, hvis dannelse er afhængig af klimatiske og geologiske forhold. Klimaændringerne forventes at påvirke mængden og fordelingen af nedbør og fordampning således, at der bliver et større nedbørsoverskud om vinteren, hvilket potentielt kan resultere i en større vandressource. Til gengæld bliver nedbørsunderskuddet større om sommeren, hvilket kan have en negativ effekt på størrelsen af vandressourcen. De lokale geologiske forhold vil være bestemmende for, hvilken af de to effekter, der bestemmer vandressourcesituationen i et fremtidigt klima.

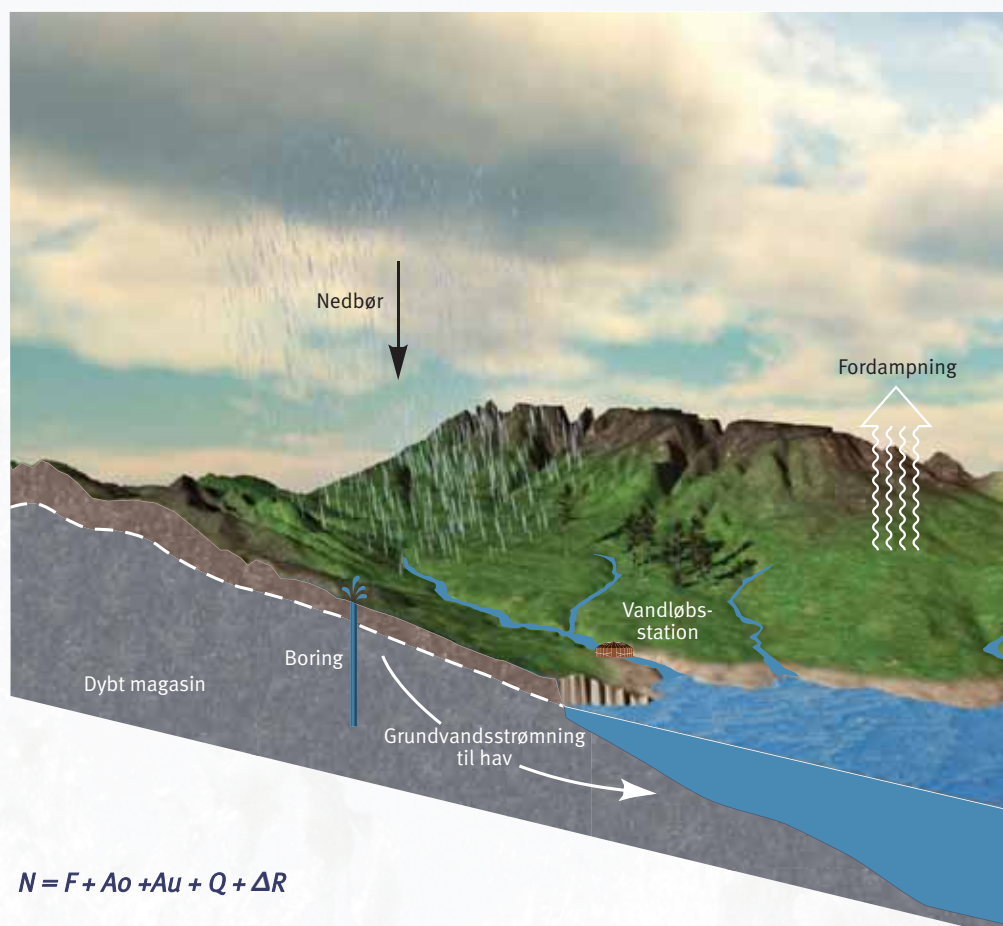
Som en konsekvens af de ændrede klimaforhold forventes det, at vandløbene og søerne bliver større, og at nye søer vil dukke op. Derfor vil også måden, hvorpå et opland drænes, blive ændret. Udvekslingen og temperaturkontrasterne mellem grundvand og søer/ vandløb vil ændres (stige) og dette kan både have en negativ og positiv effekt på overfladevandssystemerne.

Der er imidlertid mange forhold ved opgørelsen af vandbalancen og effekten af klimaændringer, som er uafklarede, hvilket har ført til etableringen af et hydrologisk laboratorium, HOBE, hvor alle elementer i vandkredsløbet måles og effekter af bl.a. klimaændringer registreres.

VANDRESSOURCER OG EFFEKTER AF KLIMAÆNDRINGER

VANDETS KREDSLØB OG VANDBALANCE

Normalt opgøres vandressourcen for et hydrologisk opland, dvs. for det areal, der udgøres af den topografiske afgrænsning til et vandløb. En vanddråbe, som falder inden for det topografiske opland, vil således ende i det pågældende vandløb. Vandressourcen for et opland kan kvantificeres ved anvendelse af vandbalanceligningen:



$$N = F + A_o + A_u + Q + \Delta R$$

N er nedbør,

F er fordampning,

A_o er vandløbsafstrømning,

A_u er grundvandsafstrømning til havet,

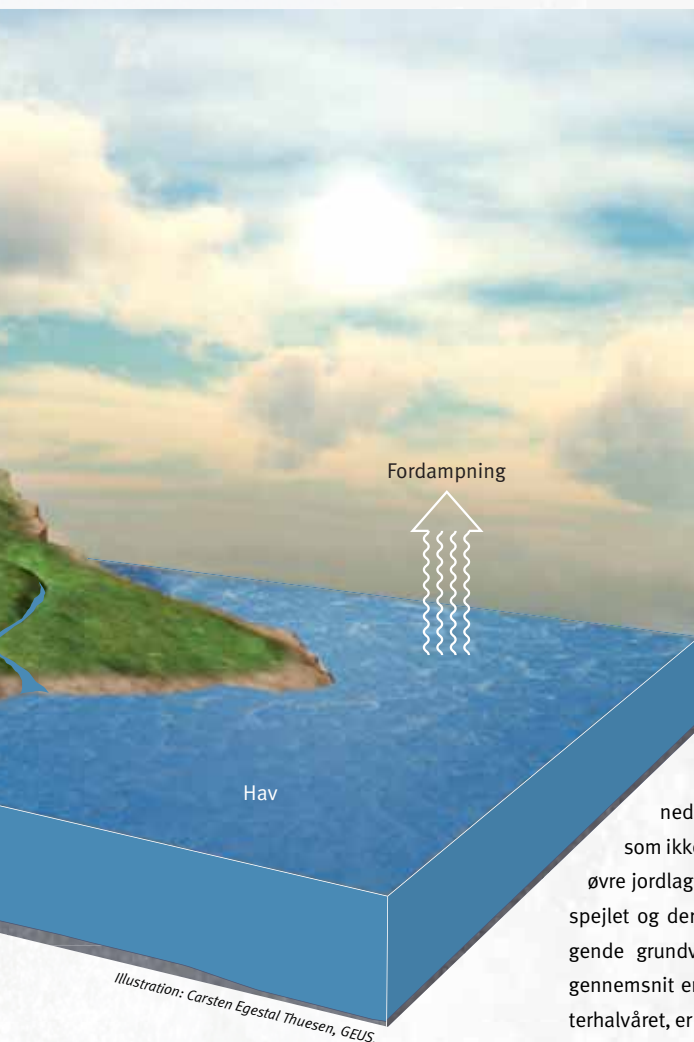
Q er oppumpning af grundvand, og

ΔR er ændringer i magasineringen af vandressourcer. Dette led antages normalt at være nul, hvis vandbalancen vurderes over flere år.

Vandbalanceligningen er illustreret i figuren ovenfor og kan beskrives således: Nedbøren (N), som falder inden for et opland, vil for størstedelens vedkommende sive ned i jorden. En del af det nedsivende (infiltrerede) vand bliver sendt tilbage til atmosfæren som fordampning (F). En anden del føres til vandløb via dræn eller overfladenære lag og bidrager til vandløbsafstrømningen (A_o). Resten bliver til grundvand,

som langsomt strømmer gennem de dybere geologiske lag. Hvis grundvandet ikke indvindes gennem vandforsyningsboringer (Q), vil det før eller siden strømme til vandløbet og give endnu et bidrag til vandløbsafstrømningen (A_o) eller strømme ud til havet udenom vandløbsstationen (A_u).

Vandbalancen opgjort på hydrologisk opland har i de senere år fået stor bevågenhed både hos forskningsinstitutioner, myndigheder og organisationer. Denne interesse er foranlediget af de skærpede krav, der stilles til udnyttelsen og beskyttelsen af vandressourcerne. Senest har implementeringen af EU's vandrammedirektiv betydet, at der er et behov for præcise opgørelser og målinger af ferskvandsressourcerne.



Det hydrologiske kredsløb: nedbøren inden for et opland omdannes til fordampning, vandløbsafstrømning, grundvandsafstrømning og oppumpning fra vandforsyningsboringer.

skyttede grundvandsmagasiner. Disse findes typisk mellem 30 og 150 meter under jordoverfladen. Kun enkelte steder, fx ved Tissø og Sjælsø på Sjælland, udnyttes overfladevand til vandforsyning og primært i spidsbelastnings-situationer om sommeren. Ud fra en overordnet vandressourcebetragtning har udnyttelsen af overfladevand ingen betydning i Danmark.

Grundvand dannes ved, at netto-nedbøren, dvs. den del af nedbøren, som ikke fordamper, siver ned gennem de øvre jordlag og strømmer ned til grundvands-spejlet og derefter videre ned til de dybereliggende grundvandsmagasiner. Da nedbøren i gennemsnit er større end fordampningen i vinterhalvåret, er det primært i perioden fra oktober til april, at nettonedbøren har en betydelig størrelse, og at der dermed er mulighed for grundvandsdannelse. Da fordampningen i denne periode er forholdsvis lav, afhænger størrelsen af nettonedbøren primært af, hvor meget nedbør der falder i vinterhalvåret. Den geologiske opbygning af undergrunden har imidlertid også indflydelse på, hvor meget af nettonedbøren, der havner i grundvandsmagasinerne. I områder med lerede jorde (som er lav-permeable og derfor vanskelige for vandet at trænge igennem), vil kraftig nedbør ikke kunne nå at infiltrere til grundvandsmagasinerne, men strømme af til vandløb via grøfter og dræn.

En præcis opgørelse af vandbalancen kræver, at de enkelte led i balanceligningen kan kvantificeres med en vis sikkerhed. For at kunne vurdere effekten af fremtidens klimaændringer er det vigtigt at vide hvordan de enkelte led i vandbalancen påvirkes. Det forventes, at fremtidens klimaændringer vil påvirke vandressourcerne i Danmark, dels fordi mængden af nedbør og fordampning og dermed grundvandsdannelsen ændres, dels fordi behovet for vand forventes at stige i takt med temperaturen.

I Danmark indvindes drikkevand næsten udelukkende fra grundvand, som befinder sig i be-

TORBEN O. SONNENBORG

Seniorforsker, GEUS
(tso@geus.dk)

KARSTEN HØGH JENSEN

Professor, IGG, Københavns Universitet
(khj@geo.ku.dk)

HENRIK SØGÅRD

Professor, IGG, Københavns Universitet
(hs@geo.ku.dk)

THOMAS FRIBORG

Lektor, IGG, Københavns Universitet
(tfj@geo.ku.dk)

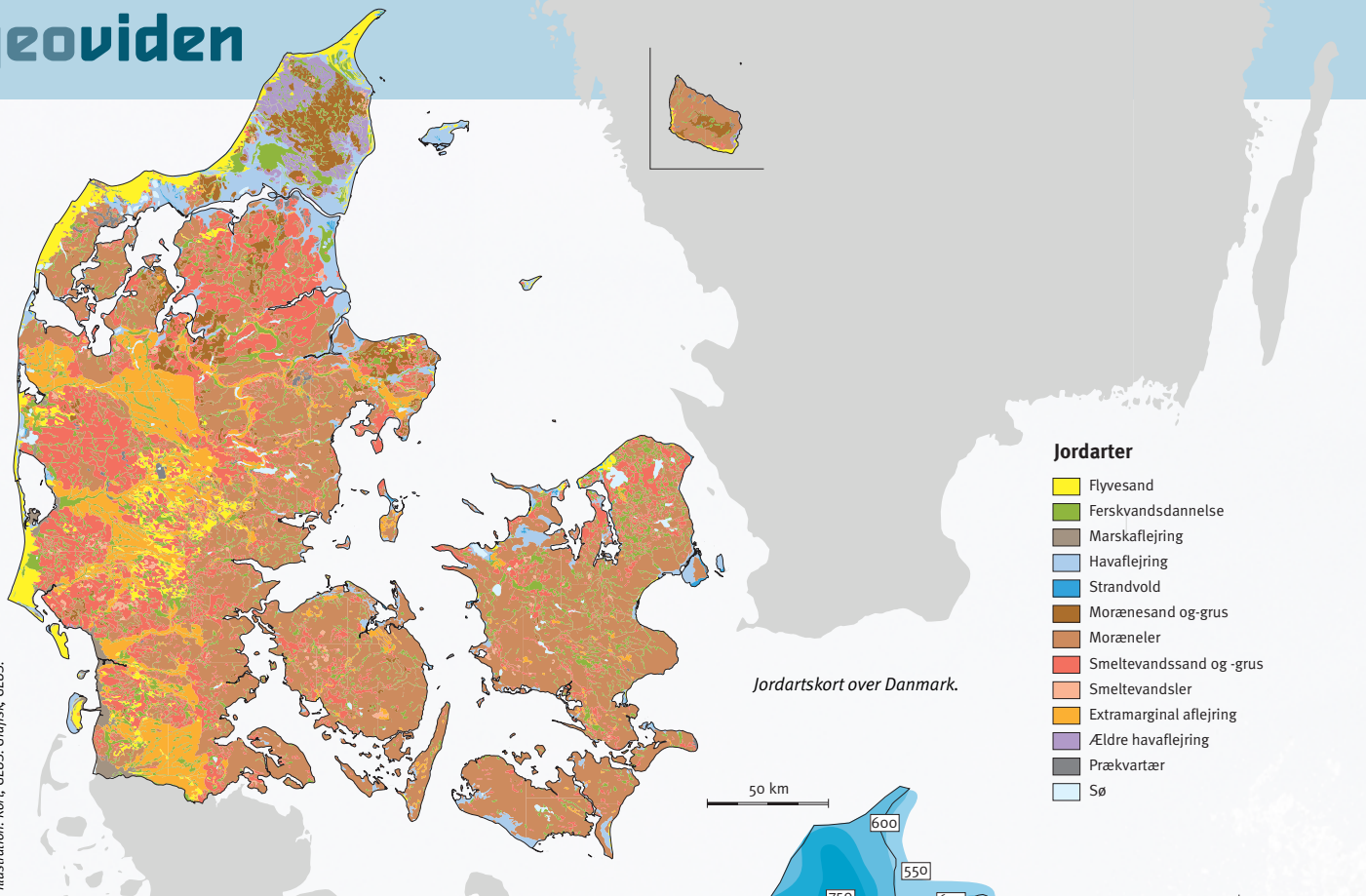
PETER ENGESGAARD

Lektor, IGG, Københavns Universitet
(pe@geo.ku.dk)

JACOB KIDMOSE

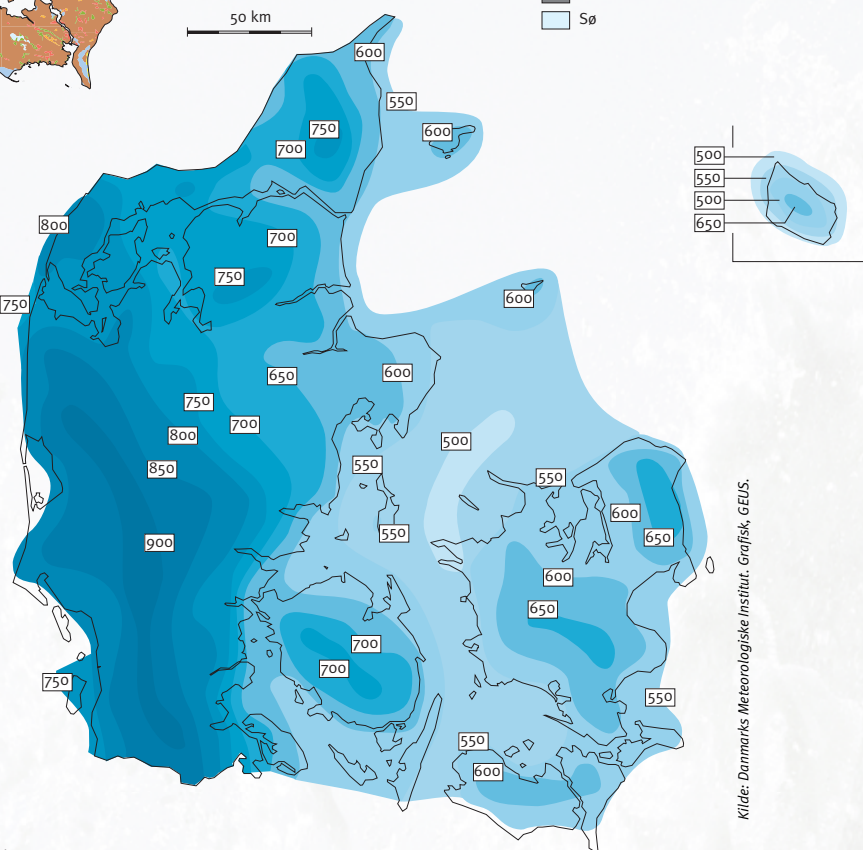
Ph.d.-studerende, IGG, Københavns Universitet
(jkb@geo.ku.dk)

Illustration: Kort, GEUS, Grafisk, GEUS.



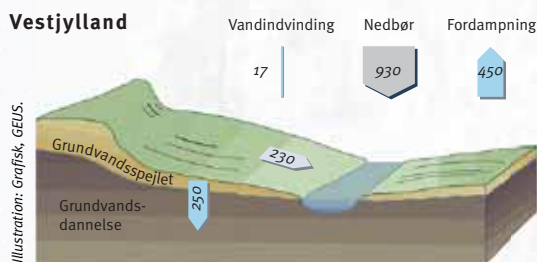
Jordartskort over Danmark.

Der er store forskelle mellem Øst- og Vestdanmark, når det kommer til de enkelte led i vandbalanceligningen. I vest er nedbøren større og jorderne mere sandede, hvilket medfører, at fordampningen er mindre. Det betyder, at der er større grundvandsdannelse og større vandløbsafstrømning. I modsætning hertil er nedbøren mindre og fordampningen større i øst, hvilket medfører en relativ mindre grundvandsdannelse. Når dette sammenholdes med, at der er et stort behov for vand i hovedstadsregionen, betyder det, at der hér er større pres på grundvandsressourcerne end i fx de vestlige dele af landet. Desuden optræder der en mere kompliceret geologi i Østdanmark, hvilket bevirker, at det hydrologiske system er mere følsomt over for grundvandsindvinding.



Kilde: Danmarks Meteorologiske Institut, Grafisk, GEUS.

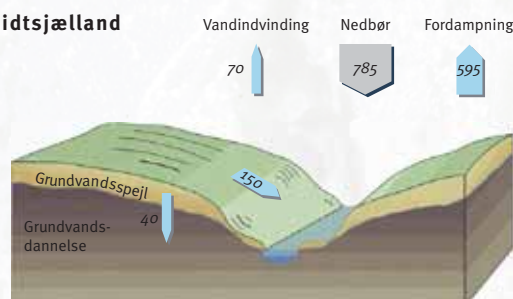
Vestjylland

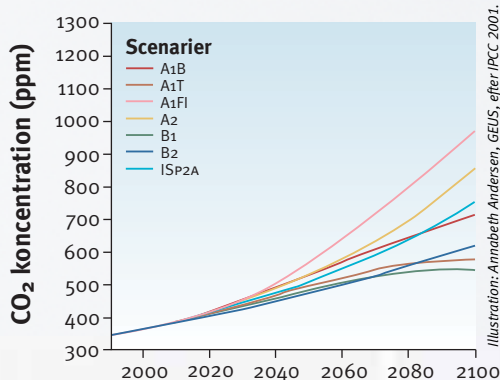
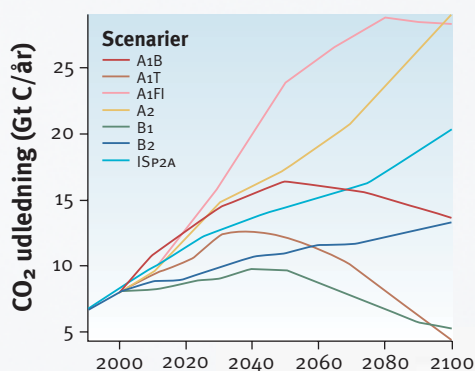


Vandbalance for områder i Vest- og Østdanmark.

Nedbørsfordeling i Danmark (mm pr. år). Værdierne viser den gennemsnitlige, årlige nedbør, beregnet for perioden 1961-1990 på målte, ukorrigerede data. For at opnå de sande værdier, skal de forhøjes med 20 %.

Midtsjælland





Scenarier for udviklingen i udledningen af drivhusgasser og koncentrationen i atmosfæren.

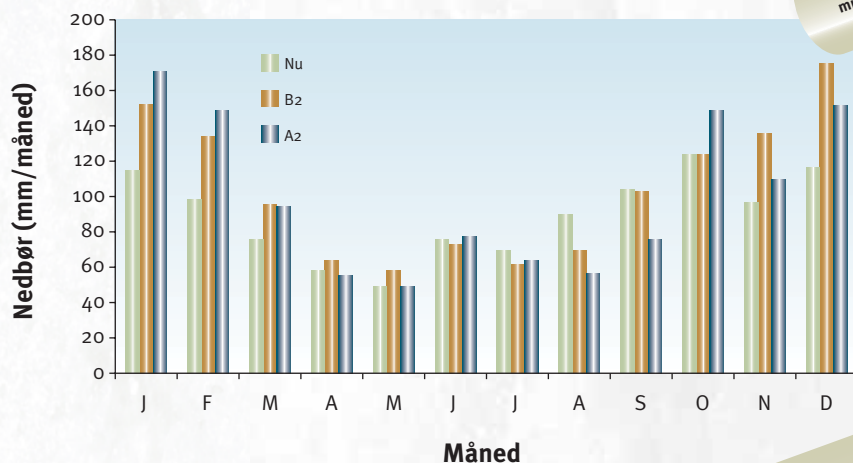
BEREGNINGER AF DET FREMTIDIGE KLIMA - KLIMAMODELLERING

Klimaændringernes udvikling afhænger af, hvordan udledningen af drivhusgasser udvikler sig. FN's klimapanel IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) har defineret en række mulige scenarier for udvikling i koncentrationen af drivhusgasser i atmosfæren ud fra antagelser om den økonomiske udvikling og energiforbrug, se figuren ovenfor. Disse scenarier kan anvendes som input til klimamodeller, som på det grundlag kan beregne udviklingen i fremti-

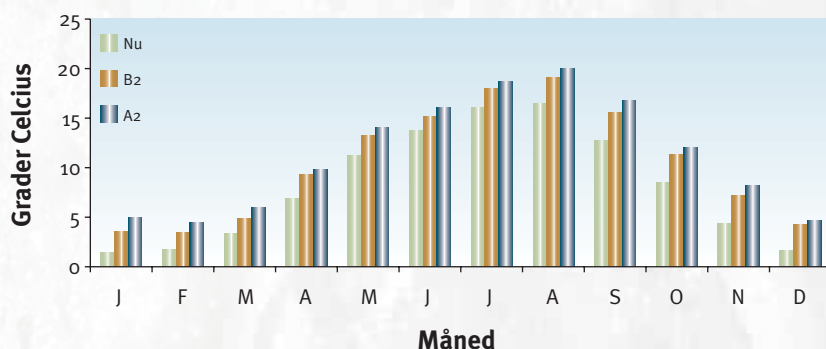
dens klima. I de fleste klimamodelberegninger anvendes to af disse scenarier: A2, hvor der forudsættes en kraftig forøgelse i udledningen af drivhusgasser og en deraf følgende kraftig effekt på klimaet og B2, som repræsenterer en mere moderat udledning af drivhusgasser og dermed en mindre effekt.

Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) har udviklet en regional klimamodel HIRHAM, som har dannet grundlag for beregninger af klimaudviklingen i Danmark. Ifølge DMI's beregninger vil nedbøren i Danmark ændre sig i løbet af det 21.

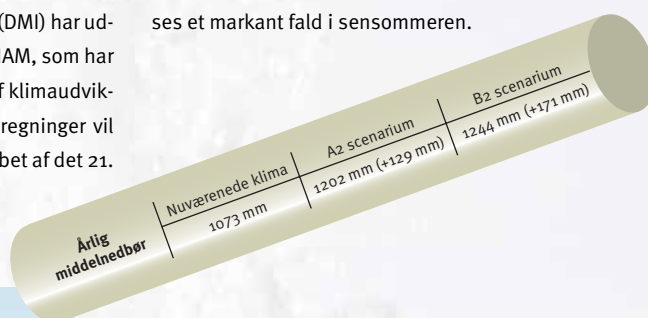
århundrede. I figuren nedenfor ses en opgørelse af den gennemsnitlige månedlige nedbørsmængde, dels for et nutidigt, dels for to fremtidige klimascenarier, A2 og B2, beregnet for perioden 2071-2100. Figuren viser, at begge klimascenarier medfører en stor stigning i vinterne-
nedbøren, mens der specielt for A2-scenariet ses et markant fald i sensommeren.



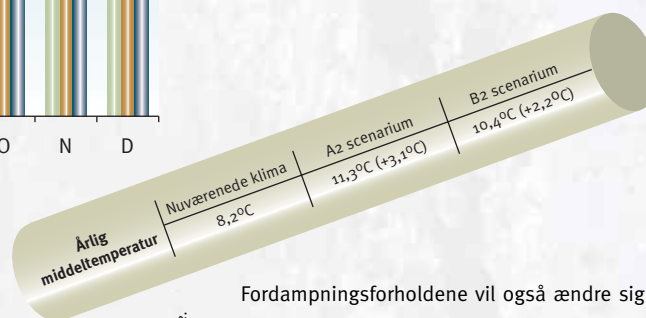
Middel månedlig nedbør i Vestjylland i nutidigt klima (Nu) og fremtidigt klima ved hhv. klimascenarium B2 og A2.



Middel månedlig temperatur i Vestjylland i nutidigt klima (Nu) og fremtidigt klima ved hhv. klimascenarium B2 og A2.

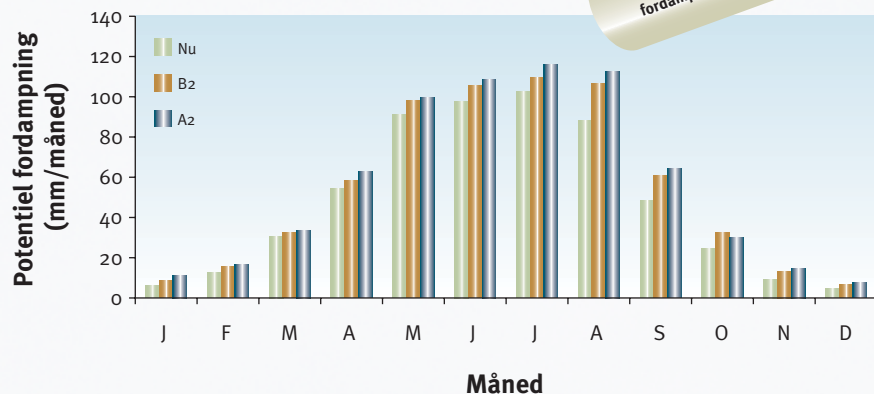


Klimaændringerne påvirker ud over nedbøren også temperatur, luftfugtighed, vindhastighed og solindstråling. I figuren nederst ses resultater for gennemsnitlig månedlig temperatur i det nutidige og fremtidige klima (2071-2100).



Fordampningsforholdene vil også ændre sig i et fremtidigt klima. På side 6 øverst er vist den potentielle fordampning, som repræsenterer den fordampning, der er betinget af indstrålingen og som kan finde sted fra en græsmark, der er velforsynet med vand. Den potentielle fordampning stiger forholdsvis kraftigt, specielt for A2-scenariet i sensommeren. Dette betyder ikke nødvendigvis, at den reelt forekommende eller aktuelle fordampning også stiger. Hvis rodzonen, dvs. de øverste 25 – 50 cm af jorden, bliver mere tør i fremtiden, fx hvis der falder mindre nedbør, kan den aktuelle fordampning godt vise sig at blive mindre end under det nuværende klima.

Illustrationer: Annabeth Andersen, GEUS, efter forfatterne.



Potentiel fordampning fra en græsoverflade i Vestjylland for nutidigt (Nu) og fremtidigt (hvh. klimascenarium B2 og A2) klima.

Illustrationer: Annabeth Andersen, GEUS, efter forfatterne.

BEREGNINGER AF KLIMAÆNDRINGERS EFFEKT PÅ DET HYDROLOGISKE KREDSLØB – HYDROLOGISK MODELLERING

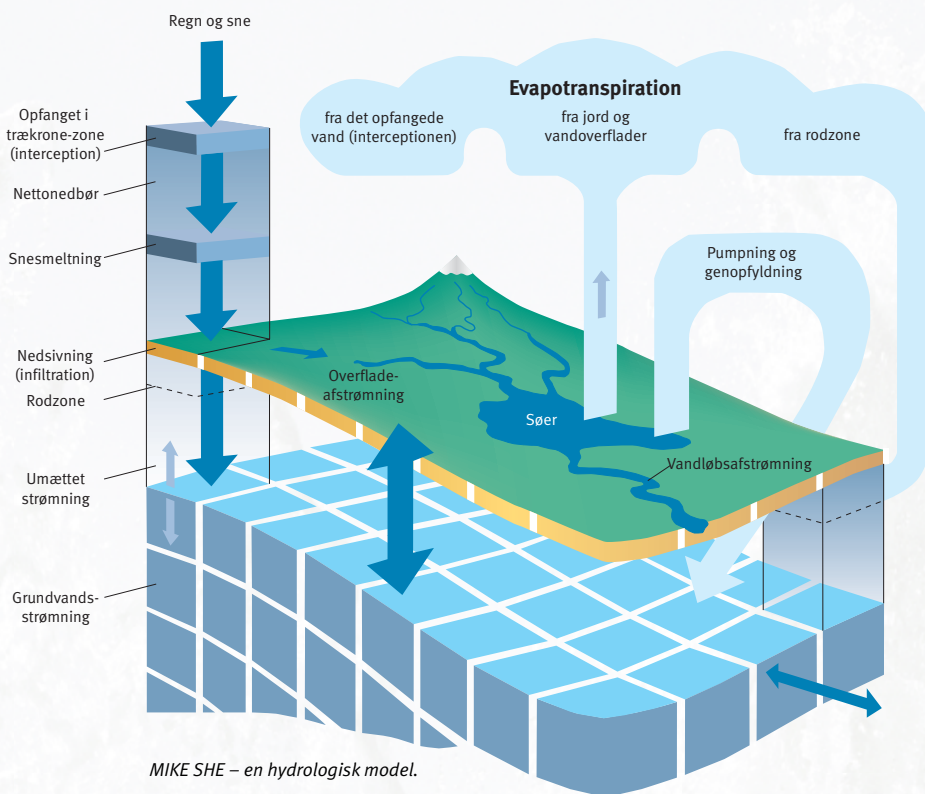
For at vurdere effekten af fremtidige klimaændringer på det hydrologiske kredsløb og på vandbalancen er resultaterne fra klimamodellen anvendt som input til en hydrologisk model, som beskriver vandets omsætning og strømningsveje inden for et vandløbsopland.

Den benyttede model, MIKE SHE, figuren til højre, er udviklet af Dansk Hydraulisk Institut (DHI) i Danmark.

På årsbasis vil nedbørsmængden i Danmark for A2 og B2 scenarierne stige med mellem 12 % og 16 % mod slutningen af indeværende århundrede. Det betyder imidlertid ikke automatisk, at grundvandsressourcen forøges. I figuren på side 7 øverst vises, hvor meget grundvandsstanden ifølge beregningerne ændres i hhv. Vest- og Østdanmark.

I Vestjylland er undergrunden sandet, og den øgede vinternedbør kan derfor let sive ned til grundvandet, som derved stiger i forhold til de nuværende forhold. Sjællands geologi er på den anden side karakteriseret ved lerede jorde (med undtagelse af Nordsjælland), og meget af den ekstra vinternedbør strømmer derfor til vandløb via dræn og grøfter og ikke ned til grundvandet, se jordartskortet på side 4.

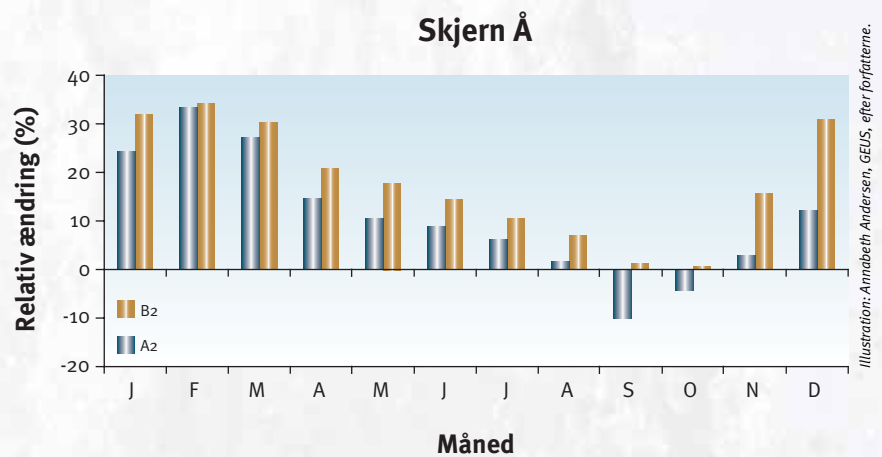
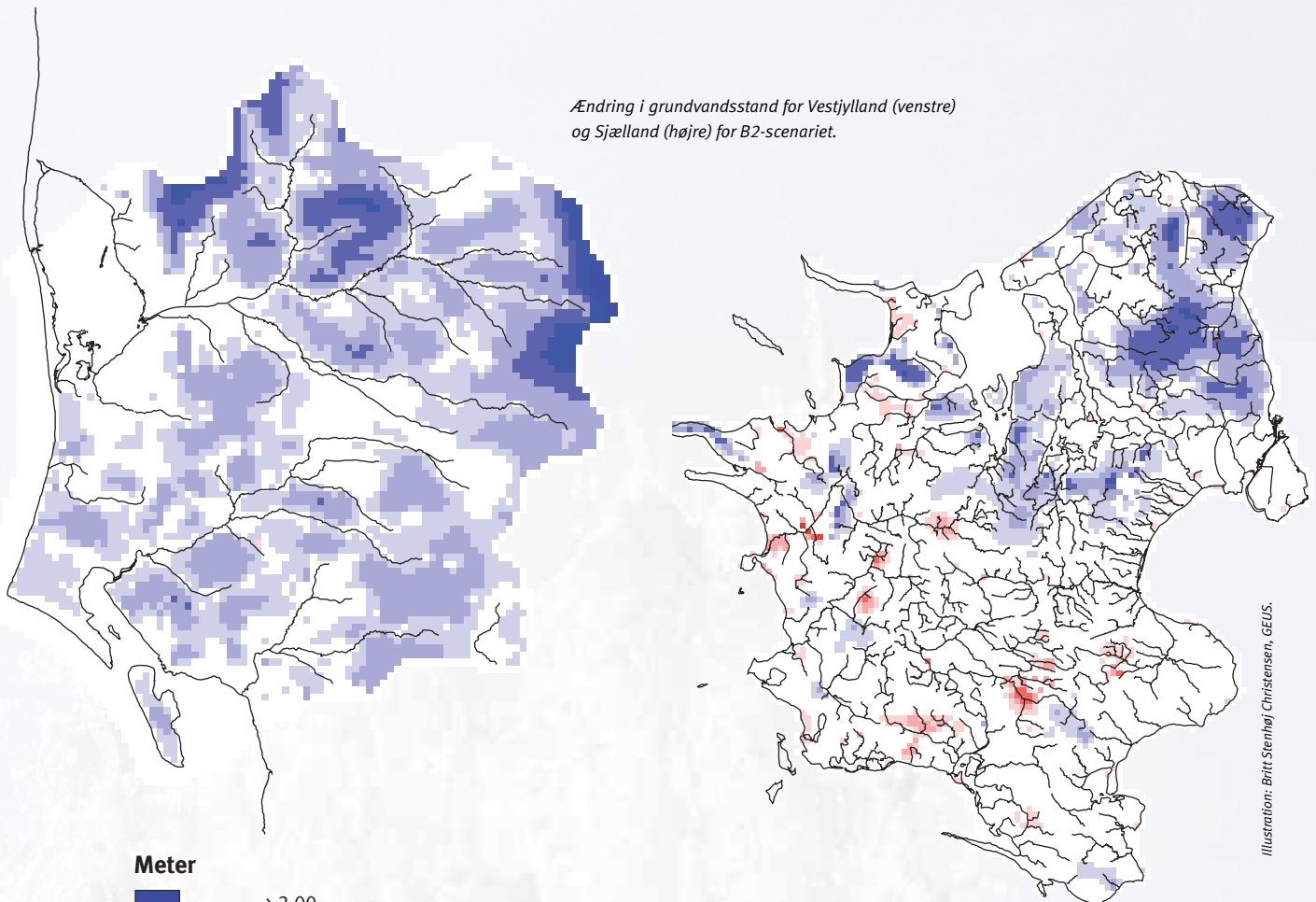
På figurene nederst side 7 og øverst side 8 ses klimaændringernes effekt på månedlig middelvandføring i hhv. Skjern Å i Vestjylland og Åmose Å på Sjælland, lidt opstrøms for Tissø. Figurene viser den relative ændring i forhold til den nuværende vandføring. I begge vandløb ses den øgede vinternedbør at slå tydeligt igennem



Illustrationer: Annabeth Andersen, GEUS, efter Dansk Hydraulisk Institut.

på vandføringen i åen, hvor der findes stigninger mellem 30 og 50 %. Til gengæld reduceres vandføringen i sensommeren i begge vandløb. Reduktionen er dog mest markant i det Sjællandske vandløb, hvor der specielt i september og oktober er tale om relative ændringer på op til 50 %. Særlig kritisk er reduktionen af vandføringen i august måned, hvor der allerede i dag ofte er problemer med at opretholde en tilstrækkelig vandføring i mange vandløb. Den re-

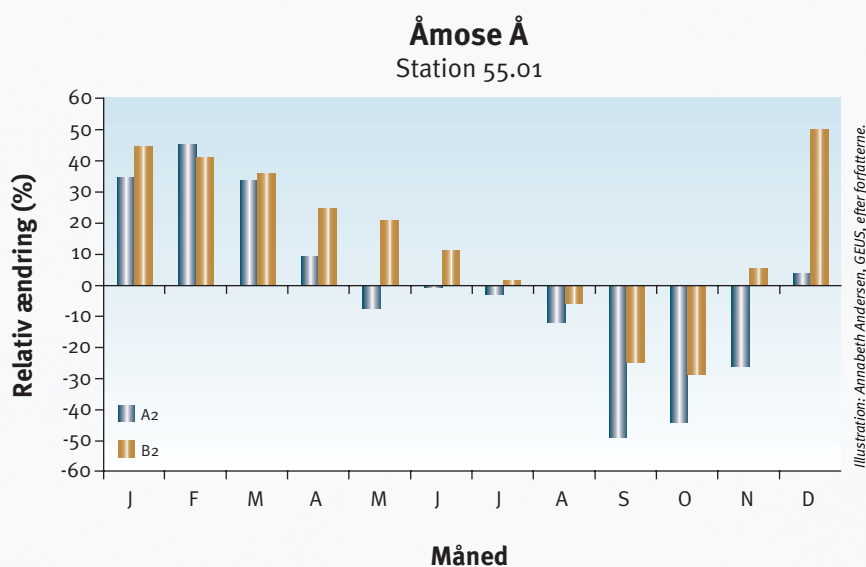
ducerede vandføring i sensommeren vil i kombination med stigende vandtemperaturer øge presset på det økologiske system i vandløbet. En anden faktor af betydning for vandløbene er indvinding af vand fra grundvandsmagasinerne, som medfører, at mængden af vand, der er til rådighed for vandløbene, reduceres. Resultaterne viser derfor, at det vil være sommervandføringen i vandløbene, som bliver kritisk for, hvor stor vandressourcen er.



Den relative ændring i middel månedlig vandløbsafstrømning ved vandføringsstation 25.05 Ahlergaarde 55.01 i Skjern Å i Vestjylland for hhv. B2- og A2-scenariene.

Åslyng ved Vejen.
Foto: Peter Warn-Moors, GEUS.





Den relative ændring i middel månedlig vandløbsafstrømning ved vandførsstation 55.01 i Åmose Å på Sjælland for hhv. B2- og A2-scenarierne.



FREMTIDIGT VANDBEHOV

Om den fremtidige vandressource er stor nok til at opfylde behovet for vand, afhænger naturligvis også af, hvordan vandforbruget udvikler sig i et varmere fremtidigt klima. Alt andet lige må det forventes, at vandforbruget stiger, når lufttemperaturen stiger. For eksempel vil incitamentet til havevanding stige, men specielt må det forventes, at behovet for markvanding, særligt på sandede jorde i den vestlige del af Danmark, vil udvise en markant stigning, se figuren nedenfor.

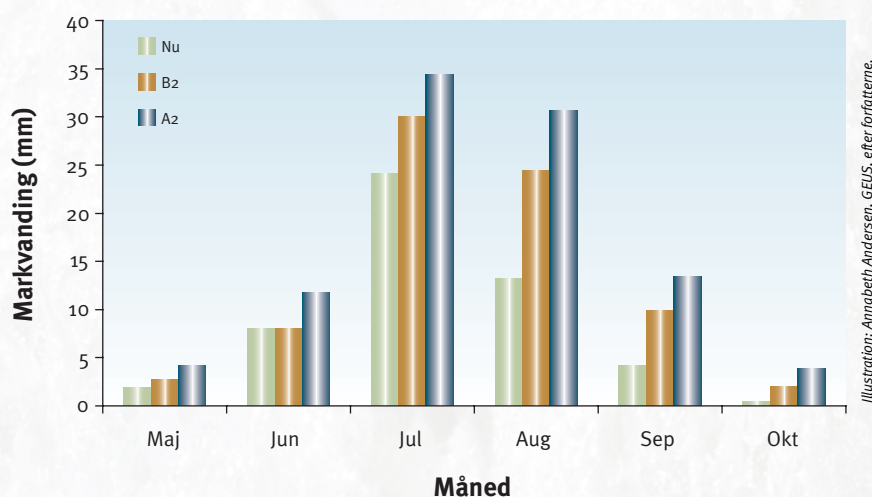
Foto: Peter Warma-Moors, GEUS.

Markvanding.

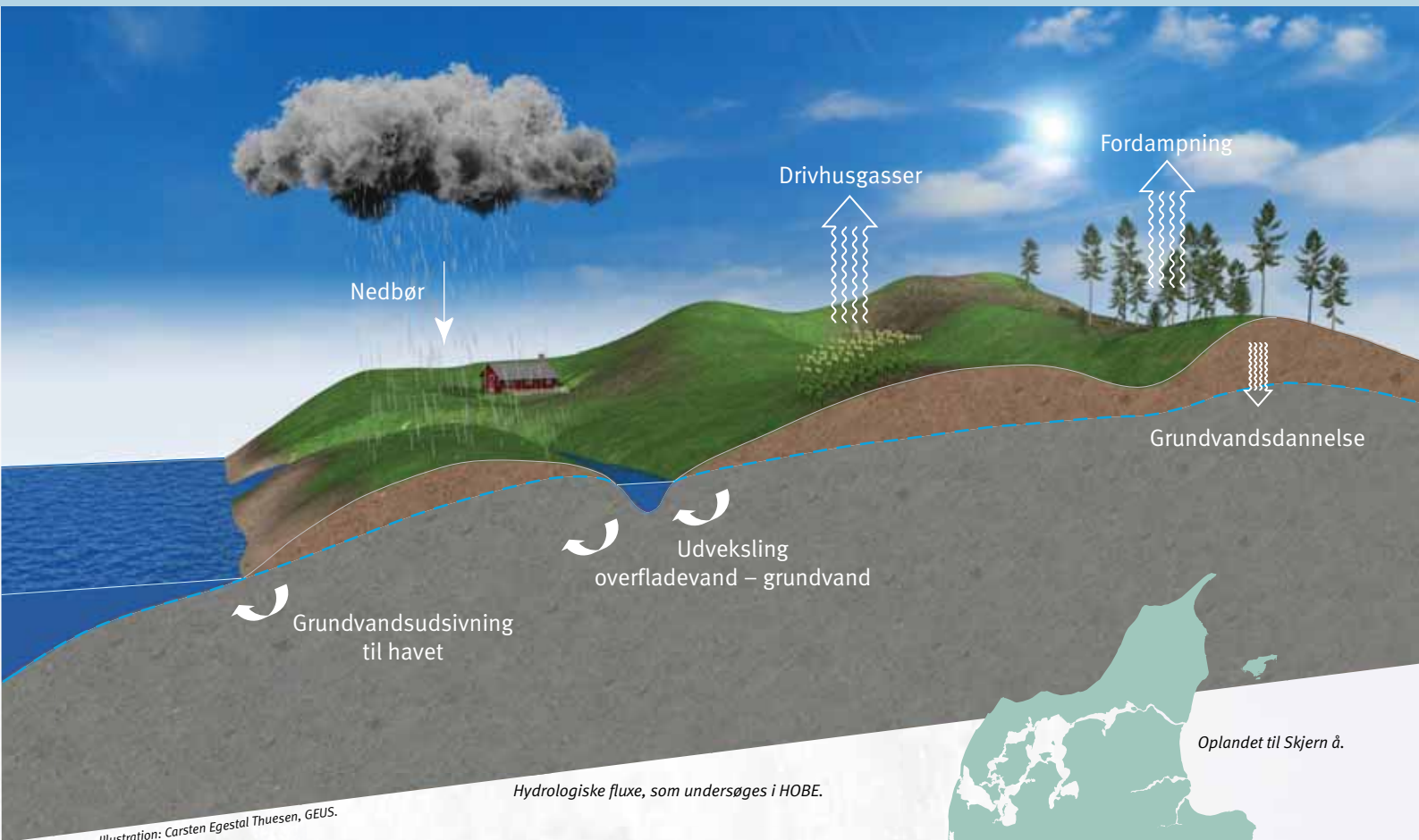


Vand nok i fremtiden?

Foto: Peter Warma-Moors, GEUS.



Markvanding i Vestjylland for nutidigt (Nu) og fremtidigt klima (A2 og B2).



MÅLINGER AF EFFEKTEN AF FREMTIDIGE KLIMAÆNDRINGER – ET HYDROLOGISK LABORATORIUM

USIKKERHEDER PÅ VANDBALANCEN NU OG I FREMTIDEN – MÅLINGER AF HYDROLOGISKE FLUXE

For at være i stand til at studere de enkelte elementer i vandbalancen er et såkaldt hydrologisk observatorium, HOBE, etableret i Skjern Ås opland, se figuren til højre.

På forskningscenteret vil man i perioden 2007 til 2012 foretage målinger af de vigtigste komponenter af oplandets vandbalance for derigennem at opnå et mere præcist billede af, hvordan arealanvendelse og klimaet påvirker de forskellige elementer i den årlige vandbalance for dette midtjyske område. Det er ambitionen, at man gennem en præcis bestemmelse af nedbør, fordampning, afstrømning, grundvandsdannelse, udveksling mellem grundvand og vandløb samt den dybe grundvandsudsivning til havet (se

ovenfor) er i stand til at tegne et bedre billede af de enkelte komponenters indbyrdes afhængighed, samt af hvordan fremtidens klima kan tænkes at påvirke den samlede vandbalance for området.

Nedbør måles dels ved traditionelle nedbørsmålere, dels ved hjælp af vejrradar. Sidstnævnte metode rummer mulighed for at få en bedre arealbestemmelse af nedbør til oplandet.

Fra master opstillet på landbrugsjord, i skov og på Skjern enges vådområder måles fordampning og udveksling af CO_2 sammen med en række meteorologiske parametre som fx solstråling, temperatur og vindhastighed.

Der benyttes også data fra forskellige satellitter til at bestemme jordfugtighed og fordampning. Sammen med målinger af nedbør, jordfugtighed og nedsivning til grundvandet fra de samme lokaliteter kan man ved brug af hydrologiske modeller og satellitbilleder bestemme vand-



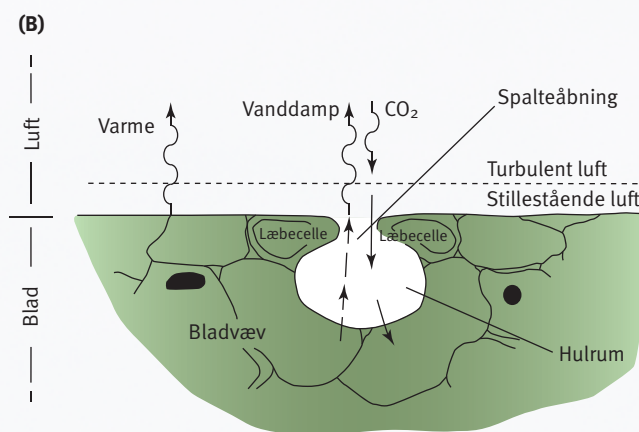
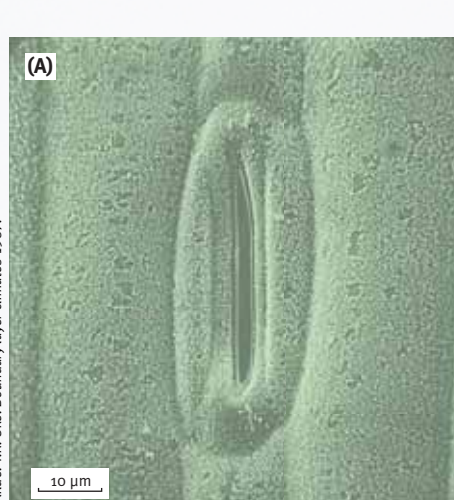
balance for det samlede opland til Skjern Å, der er på over 1200 km².

Studiet af de enkelte dele af vandbalancen i det samme opland kan dels give et forbedret indblik i, hvordan fremtidige klimaændringer vil påvirke fx fordampningens størrelse, dels give indsigt i, hvilke arealanvendelsesformer (fx landbrug eller skov) som vil være mest påvirkelige af klimatiske ændringer.

Skjern å.

Foto: Claus Kern-Hansen, DMI.



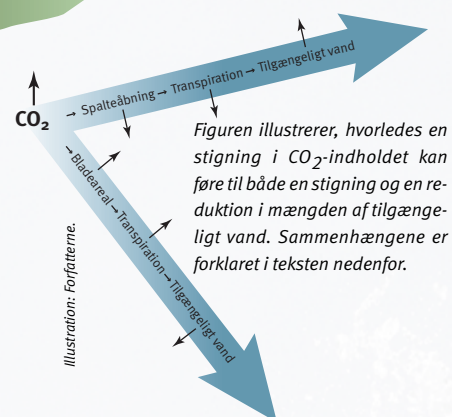


Figuren viser hhv. et foto af en spalteåbning i et blad (A) og en tegning af et blad på tværs af en spalteåbning (B). I botanisk fagsprog kaldes en spalteåbning stoma, der er græsk og betyder mund.

FORDAMPNING I ET VARMERE OG CO₂-BERIGET KLIMA

Stigningen i temperaturen vil påvirke vandkredsløbet på flere måder. Vækstbetingelserne bliver bedre, hvilket bl.a. kan resultere i at vækstsæsonen bliver længere, at der anvendes mere end én afgrøde per sæson, og at der muligvis vil blive introduceret nye afgrøder. Dette vil sammen med stigningen i CO₂-koncentrationen påvirke fordampningen fra jord og planter. Fordampningen, også kaldet evapotranspirationen, stammer hovedsageligt fra jorden og vegetationen. Jordfordampningen er en relativ simpel fysisk proces, hvis størrelse bestemmes af energitilførsel samt luftens og jordens vandindhold. Fordampningen fra de grønne planter, transpirationen, er desuden kontrolleret af den biologiske aktivitet. Alle blade har således mikroskopiske åbninger, de såkaldte spalteåbninger, hvis åbningsgrad planten kan kontrollere, og dermed styre mængden af vanddampsmolekyler, der fra bladets indre diffunderer ud i luften, se figuren ovenfor.

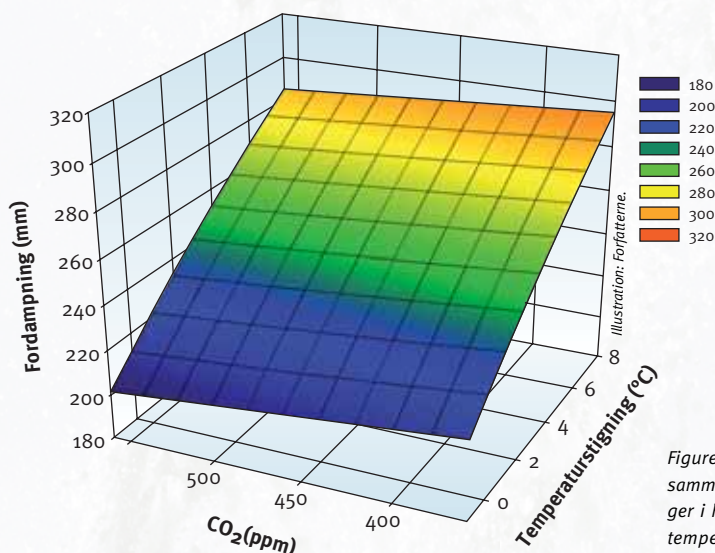
Når spalterne er åbne, diffunderer CO₂-molekyler den modsatte vej, fra luften ind i planternes hulrum. Dette giver planterne mulighed for fotosyntese og dermed vækst. Spalteåbningernes funktion er således at sikre tilførsel af den nødvendige mængde CO₂ uden at miste for meget vanddamp. Hvis planterne har tilstrækkelig vandforsyning gennem rødderne, så vil spalteåbningerne i dagtimerne være åbne, men de vil lukke om natten, hvor der alligevel ikke kan foregå fotosyntese. Modsat vil planterne i tilfælde af tørke delvis lukke spalteåbningerne for at kunne overleve, mod til gengæld at reducere væksten. For at vurdere konsekvenserne af et fremtidigt varmere og CO₂-rigere klima for vandbalancen kan det på forhånd antages, at et øget CO₂-indhold vil betyde, at det bliver lettere for planterne at få fat i den nødvendige mængde CO₂ (figuren ovenfor til højre). Spalterne behøver således ikke at åbnes maximalt. Herved reduceres transpirationen fra planterne og dermed den samlede fordampning. Vi får mere tilgængeligt vand. I tempererede og kolde klimaer ser vi imidlertid



også, at den naturlige vegetation på årsbasis får et større areal af grønne blade. Dette skyldes ikke mindst, at den højere temperatur giver mulighed for en længere periode med vækst. Et større bladareal betyder, alt andet lige, større transpiration og dermed mindre tilgængeligt vand.

For at kunne sammenligne størrelsen af de to modstridende påvirkninger af vandbalancen anvender vi en kombination af direkte målinger af fordampningen sammen med en mekanistisk model. Da 75 % af Danmarks landoverflade består af landbrugs- og græsarealer, hvis bladareal kontrolleres af et effektivt landbrug, går vi ud fra, at der ikke sker en forøgelse af bladarealet. Når den fremtidige fordampning stiger, skyldes det især CO₂-berigelse og temperaturstigningen, idet jo varmere luften er, jo mere vanddamp kan den indeholde. Nettoresultatet ses i figuren til venstre, hvor den aktuelle fordampning i midten af vækstperioden (fra slutningen af april til starten af juli) for vinterhvede, Danmarks vigtigste afgrøde, er afbildet.

Af figuren kan det således ses, at ved de nuværende temperaturforhold (temperaturstigning = 0°C) vil der ske en reduktion i transpirationen fra ca. 225 mm til 210 mm hvis CO₂ indholdet stiger til 560 ppm. Hvis CO₂ stigningen sker samtidig med en 4°Cs temperaturstigning over de næste 50 år (som forudsagt af mange modeller) betyder det en forøgelse af transpirationen fra 225 mm til 250 mm og dermed sættes ekstra pres på vores vandressourcer.



Figuren illustrerer de indbyrdes sammenhænge mellem ændringer i hhv. fordampning, CO₂ og temperatur. Se teksten i højre spalte for yderligere forklaring.

GRUNDVANDSUDVEKSLING MED VANDLØB OG SØER I ET FREMTIDIGT KLIMA

EKSEMPEL FRA SKJERN Å-SYSTEMET

Nedenunder ses en principskitse af de topografiske forhold i et vest-øst tværsnit, fra Vesterhavet, ved kote 0 meter, over Ringkøbing Fjord til ca. 85 km inde midt i Jylland, hvor det topografiske skel befinder sig. Det ligger her i over kote 100 m.

Den nedbør, der falder over dette område, drænes hovedsaglig via grundvandet til søer og Skjern Å-systemet og derfra til Ringkøbing Fjord for så at ende i havet. Ude ved havet vil der være saltvandsindtrængning. Ringkøbing Fjord er forbundet med havet og indeholder derfor også

saltvand (brakvand) og grundvandet under fjorden vil følgelig også være saltholdig. I klitterne er der en lille pude af ferskvand over grundvandet. Grundvandsspejlet (anno 2009) er vist på figuren. På regional skala kan man betragte grundvandsstrømning som drevet af topografien, dvs. grundvandsspejlets placering følger topografien. Ved det topografiske skel finder man det jyske vandskel med grundvandet omkring kote 100 m. De ca. 100 meters forskel til havet er med til at drive grundvandet mod kysten. Undervejs vil grundvandet strømme til søer og vandløb, specielt i de områder hvor der

er lavninger i landskabet. Hampen sø, der er vist på skitsen, ligger fx i et dødishul og vandløbene ligger typisk i ådale, der er formet af isens afsmeltning under sidste istid. Dette er fx tilfældet ved Holtum Å. På den nedre del af Skjern Å-systemet, ved Skjern Enge, ligger grundvandsspejlet tæt på terræn og der er meget vådt. Ringkøbing Fjord holdes, via regulering af sluserne, på en vandstand, der er ca. 0,2 m højere end havet (0 m). Infiltration af regnvand, topografi, geologi og vandløb/søer bestemmer, hvordan grundvandet strømmer fra højderyggen til havet. Tæt ved søer og vandløb vil infiltrerende

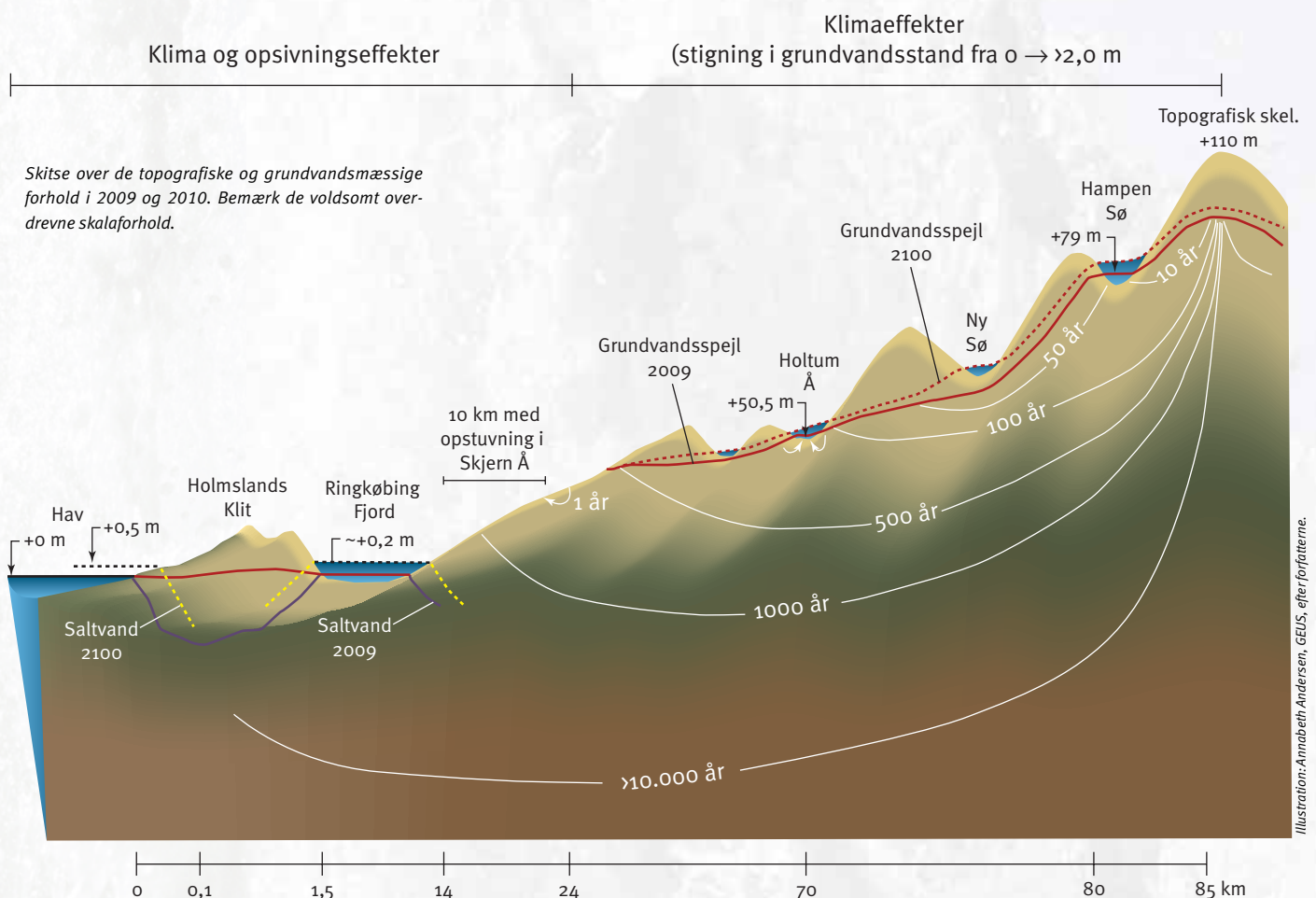
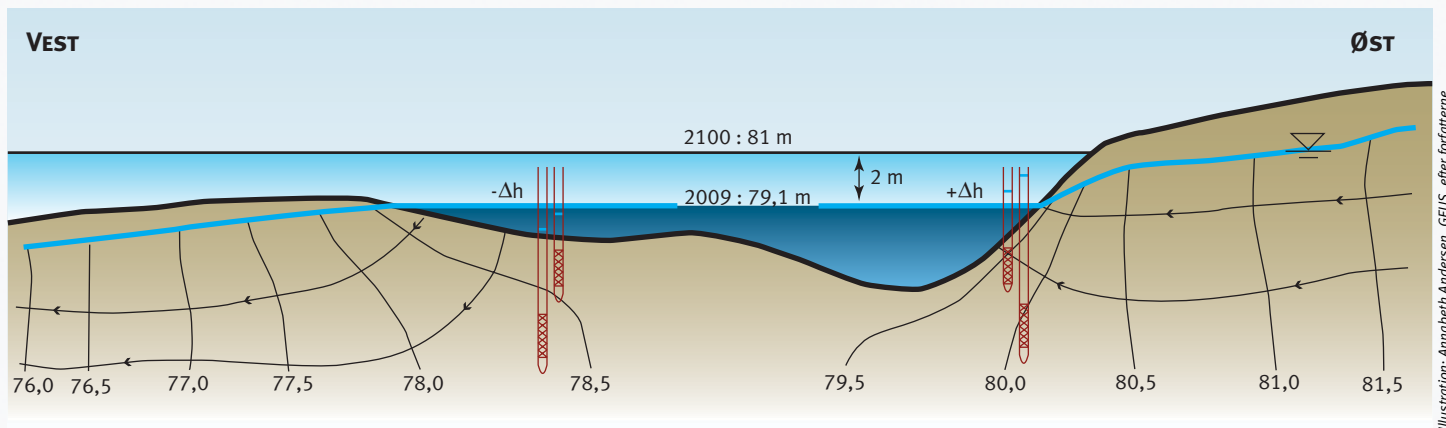




Foto: Jakob Kidmose.



Øverst: Billede af Hampen sø set fra vest mod øst. Nederst: Skitse af Hampen sø (vest-øst) visende ind- og udstrømning fra Hampen sø. Figuren viser også søens vandstand i et fremtidigt klima (B2). Denne er indtegnet med en vandstand i kote +81 m.

regnvand hurtigt nå dertil; det vil tage mellem 1 og 10 år. På større skala vil regnvand, der infiltrerer ved det jyske vandskel, være 100-1000 år om at nå til vandløb/søer eller Skjern Enge eller mere end 10.000 år om at nå ud til havet.

Hvad betyder klimaændringer så for interaktionen mellem grundvand og overfladevand (havet, fjorde, vandløb, søer)? Man kan dele det op i to effekter: Stigning i havniveauet og ændrede klimatiske forhold. Kystdirektoratet bruger A2 scenariet og udregner en vandstandsstigning på omkring 0,5 m ved Vestkysten i år 2100. Hvis Ringkøbing Fjord reguleres på sam-

me måde til den tid vil vandstanden i fjorden stige med samme størrelse, hvilket vil give opstuvningseffekter langs Skjern Å, så langt som ca. 10 km ind i landet. Området Skjern Enge, ved udløbet til Ringkøbing Fjord, må derfor formodes at blive langt større, end det er nu. Figuren øverst på side 7 viser simulerede ændringer i grundvandsstanden som følge af klimaændringer. Det nye grundvandsspejl (anno 2100) er indtegnet skematisk på figuren side 11. Ved fjorden og Skjern Enge er ændringerne små mens de er over 2 m ved det jyske vandskel.

Hampen Sø ligger umiddelbart vest for det

jyske vandskel og er en grundvandsfødt sø, se ovenfor. Søens vandspejl ligger i kote ca. 79 m og grundvand strømmer til søen fra nord, øst og syd og siver ud af søen fra den vestlige bred. I vinterperioden drænes søen i den vestlige del af en lille rende (Ålerenden). Mod øst stiger terrænet hurtigt til op over 100 m. Mod vest falder terrænet roligt.

Beregninger med en grundvandsmodel viser at søens vandstand stiger med hhv. 0,2 m (A2) og ca. 2 m (B2) under ændrede klimaforhold, se figuren side 13. I det mest dramatiske tilfælde, B2, vil søens udbredelse være som vist nedenfor. Kragssø, der ligger umiddelbart nordøst for søen, vil nu være direkte forbundet med søen, men ellers sker de største ændringer vest for søen, hvor Ålerenden vil være permanent vandfyldt og søen vil muligvis forbindes via denne med den øvre del af Skjern Å-systemet. Som det ses bliver hovedvej A13 oversvømmet. Det skal



Foto: Jannick Kolbjørn Jensen.

Holtum å 14 km nedstrøms med en vandføring på ca. 2 m³/s. Billedet viser også tre målestationer ude i vandløbet der kontinuert logger temperaturen i 14 punkter i vandløbssedimentet (0-3 m's dybde). Afmaskningen illustrerer en situation, hvor vandstanden er ca. 0,5 m højere end den nuværende.

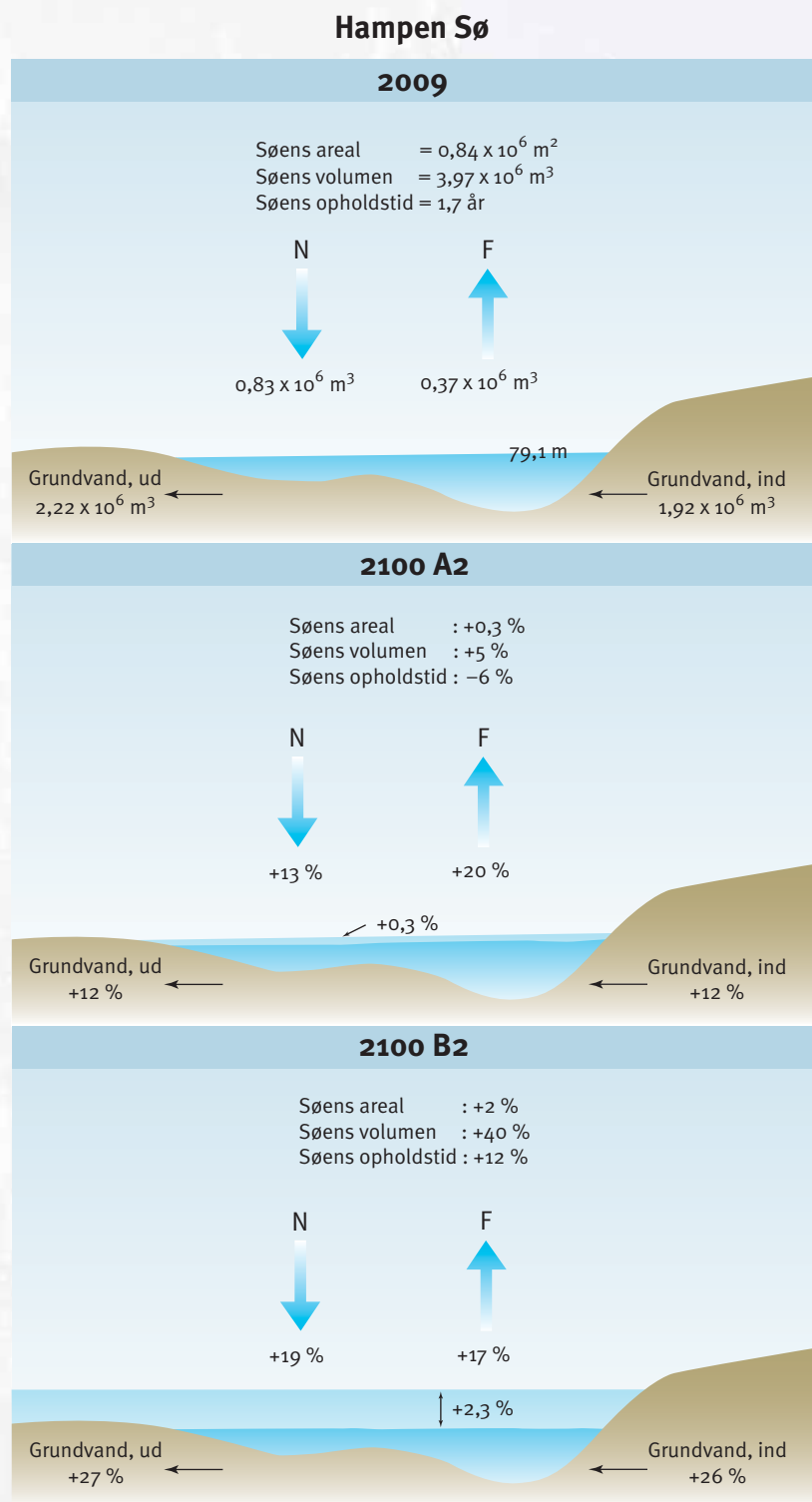


Illustration: forfatterne.

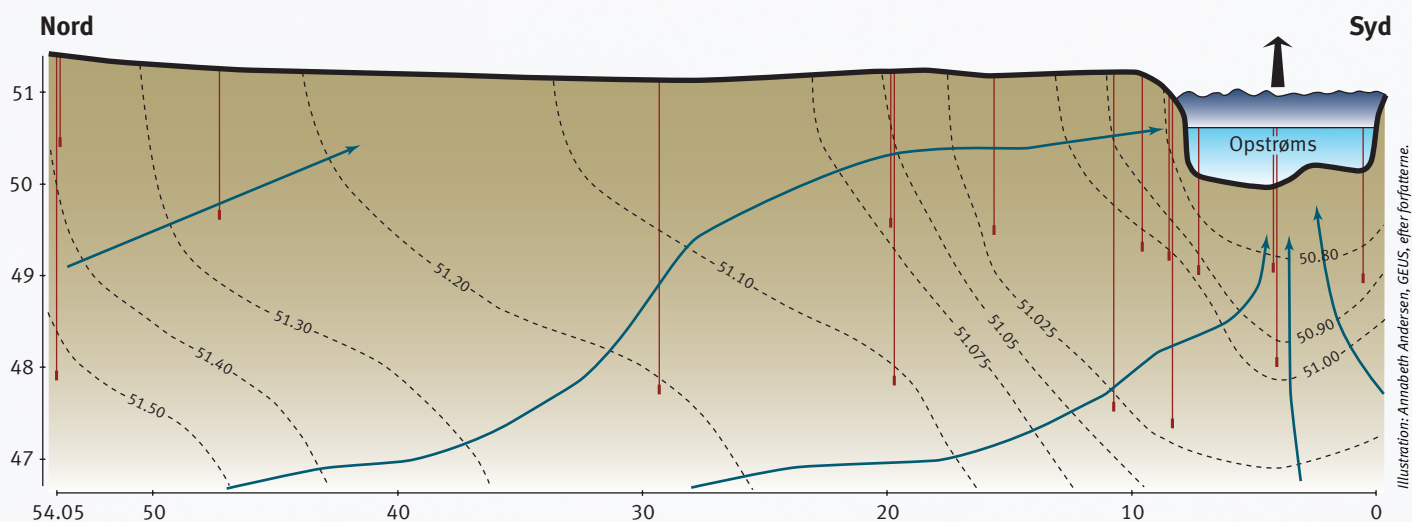
Eksempel på Hampen sø med en øget vandstand på ca. 2 m (+81 m).

dog siges, at den øgede drænende effekt af Ålerenden ikke er med i beregningerne, så det må antages, at stigningen i søens vandstand bliver mindre end 2 m (B2). Søens økologiske tilstand afhænger blandt andet af tilstrømningen af næringsstoffer fra de omkringliggende marker. Figuren til højre viser beregninger over søens årlige vandbalance.

Årsmiddelnedbøren stiger med ca. 13 % og 19 % i hhv. A2- og B2-scenariet. Denne nedbør tilføres søen direkte. Men samtidig er der også direkte fordampning fra søen (stigning på 20 % og 17 % i A2 og B2) og da der altid er vand til rådighed for fordampning vil der netto relativt tabes mere vand fra søen direkte som følge af de klimatiske ændringer i A2 (-7 %), mens der vil være en lille stigning i B2 (2 %). Grundvandsstanden vil stige i området omkring Hampen Sø og øge grundvandstilstrømningen med hhv. 12 % og 26 % (A2 og B2). I A2 kan den øgede fordampningstab direkte fra søen holde trit med den øgede grundvandstilstrømning og vandstanden stiger kun beskedne 0,3 %. I B2 vil den kraftige stigning i grundvandstilstrømning kombineret med en nettotilvækst på søen (nedbør ÷ fordampning) betyde, at søens vandstand stiger 2,3 %, svarende til ca. 1,8 m. Alt dette betyder også, at udstrømningen til grundvandet ændrer sig med en stigning på hhv. 12 % (A2) og 27 % (B2). Når søens vandstand stiger, øges søens volumen. De ændrede forhold i tilstrømning/udstrømning og søens volumen betyder at opholdstiden i søen, dvs. den tid det tager at udskifte alt søens vand, ændres. I A2-scenariet vil opholdstiden formindskes, da søens tilvækst i volumen er mindre end fx søens totale udstrømning. Omvendt i B2-situationen; her stiger opholdstiden fordi søens volumen stiger relativt mere end den øgede udstrømning. Da opholdstiden kan have konsekvenser for tilbageholdelsen af næringsstoffer og søtilstand generelt, vil der altså være modsat rettede effekter i de to klimascenarier.



Hampen Sø under de nuværende klimatiske forhold og ved A2 og B2 scenarierne.



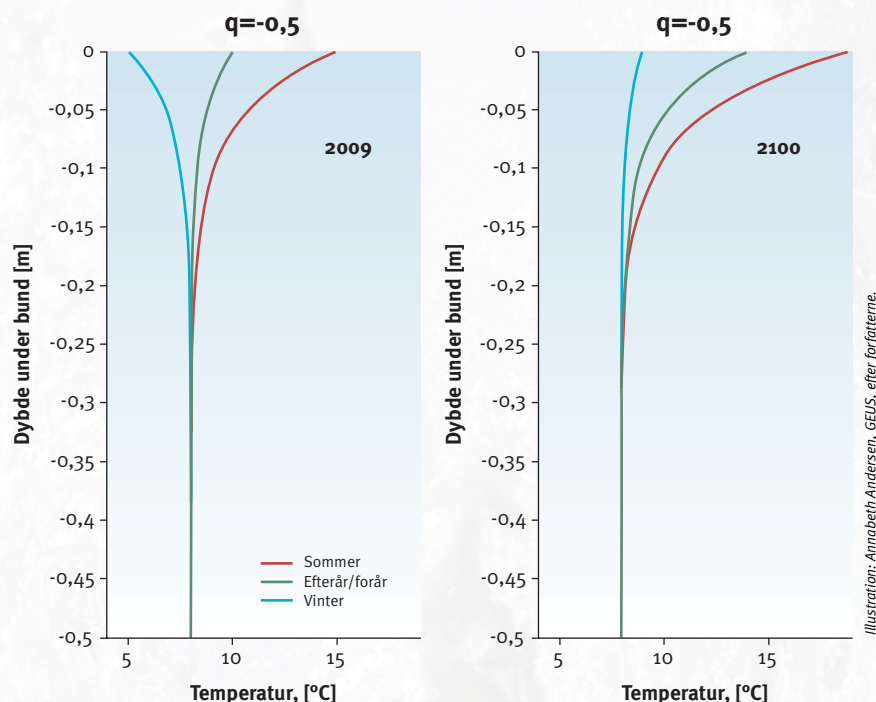
Eksempel på målt grundvandstilstrømning til Holtum å (14 km). Åen modtager vand fra de dybere dele. Vandstanden i 2009 er ca. 50,6 m. En +0,5 m vandstand (2100) er også indtegnet. Temperaturerne logges ned til 3 m's dybde og kan give information om tilstrømningen.

Udvekslingen mellem grundvand og vandløb undersøges ved Holtum Å i den øvre del af Skjern Å-systemet, side 12 nederst til venstre. Formålet er at kigge på, hvordan vandløbssedimentet, de tilknyttede vådområder, den regionale geologi og landskabet tilsammen styrer tilstrømningen til vandløbet. I fremtiden vil det være vigtigt at forstå, hvordan vandløb dræner grundvandet. Åen slynger sig gennem landskabet, og fra udspringet og ca. 14 km nedstrøms øges vandføringen med omkring 2 m³/s. Figuren ovenfor viser strømningsmønsteret i vådområdet omkring Holtum Å. Grundvandsstanden varierer fra ca. 51,5 til 50,6 m.o.h. (vandløbets vandstand).

I fremtiden vil dette område være udsat for en øget grundvandstand på ca. 0,25-0,5 m (jævnfør figur side 11). Vandstanden i vandløbet varierer med 10-30 cm om året afhængig af regnskyl. Umiddelbart kan vi derfor forvente, at vandstanden i vinterperioden vil være "lige ved kanten" under normale regnskyl og – alt andet lige – gøre de tilstødende områder endnu mere våde. Vækst af grøde i sommersæsonen kan betyde en opstuvning, der resulterer i en stigning i vandstanden på over 30 cm. Om sommeren kan man derfor forvente en lignende situation. Grundvandet, der ledes til vandløbet, kan være af vidt forskellig alder. Den del af nedbøren, der infiltrerer vådområdet, når ud til vandløbet på kort tid (<1 år), mens den dybe tilstrømning kan være 100-1000 år gammel. I et nyt klima vil vandløbet så at sige blande effekterne fra det

gamle og nye klima. Temperatur bruges til at vise udvekslingen mellem vandløb og grundvand, se figuren nedenfor. Grundvand har en konstant temperatur svarende til luftens årsmiddeltemperatur (ca. 8°C i 2009), mens vandløbet har en døgn- og sæsonmæssig rytme i vandtemperaturen. Ved Holtum Å varierer temperaturen fx 10°C fra vinter til sommer (fra 5 til 15°C). Hvis der ikke var nogen grundvandstilstrømning ville temperaturen i vandløbssedi-

mentet på grund af varmeledning reflektere denne årlige variation. Ved Holtum Å er tilstrømningen fra grundvandet i størrelsesordenen 0,5 m³/dag, dvs. der strømmer 0,5 m³ (eller 500 l) ind over et areal på 1 m² på en dag. Om sommeren bringes der derfor koldt vand med op i vandløbssedimentet, og modsat om vinteren; her bringes der relativt varmt vand op. I et fremtidigt klima vil årsmiddeltemperaturen stige med omkring 4°C. Det kan antages, at



Temperaturfordeling under vandløbssediment med en indstrømning på 0,5 m³/dag og en årlige sæsonmæssig variation på 10 °C. I 2009 er middel vandløbstemperaturen 10 °C, i 2100 er den øget 4 °C.



Foto: Peter Wama-Moors, GEUS.

Lille dreng ved Gefionspringvandet (1990) i København.

vandløbstemperaturen vil følge lufttemperaturen og også i middel stige med 4°C. Da grundvandstilstrømningen typisk repræsenterer en alder på over 100 år vil grundvandets temperatur forblive omkring 8°C i år 2100. Figuren nederst side 14 viser beregninger af temperaturen i et vandløbssediment i 2009 og 2100 (efterår og forår er ens). Ved bunden og umiddelbart der under følger temperaturen den årlige svingning i vandløbets temperatur. Med uændrede hydraul-

iske tilstrømningsforhold ses det at sedimentet i år 2100 har temperaturer på over 8°C hele året. Den øverste zone (0-20 cm) er den aktive biogeokemiske zone og her vil en temperaturstigning alt andet lige betyde at disse processer vil forløbe hurtigere. Et vandløbssediment er hurtigt frit for ilt blot i nogle få centimeters dybde og man kunne derfor forvente, at fjernelsen af nitrat, der kommer med grundvandet (denitrifikation) ville forløbe hurtigere.

Som en konsekvens af de ændrede klimatiske forhold må vi således forvente at vandløbene og søerne bliver større, ligeså vel som der vil dukke nye (mindre) søer op, se side 11. Måden, hvorpå et opland drænes, vil derfor ændres. Udvækslingen og temperaturkontrasterne mellem grundvand og søer/vandløb vil ændres (stige) og dette kan både have en negativ og positiv effekt på overfladevandssystemerne.



EFFEKTER AF FORTIDIGE KLIMAÆNDRINGER

– MULIGE SCENARIER FOR FREMTIDEN

Modelbaserede forudsigelser af de næste 100 års klimaudvikling i Danmark angiver en stigning i henholdsvis temperaturen, mængden af nedbør, antallet af kraftige storme og havniveauet. Disse ændrings påvirkninger af land- og vandmiljøet kan forudsiges på forskellige måder. Én måde består i at se på effekterne af fortidige klimaændringer, idet alle disse forudsagte ændringer har fundet sted tidligere i den nuværende mellemistid, Holocæn, som startede for ca. 11.700 år siden. I det følgende skal der præsenteres to eksempler på effekterne af fortidige ændringer i klimaet. Det ene eksempel viser, hvordan en nedbørsstigning kan lede til en grundlæggende økologisk ændring af et sø-økosystem, og det andet eksempel illustrerer, hvordan et stigende havniveau har påvirket grundvandsstand samt søniveau og dermed ferskvandsressourcen. De to eksempler er baseret på sedimentologiske, geokemiske og biologiske undersøgelser af sedimentkerner udtaget fra bunden af henholdsvis Højby Sø og Tengslemark Mose, begge beliggende i Odsherred, Nordvestsjælland.

Direkte målinger af variationer i klimaet (fx temperatur og nedbør) eksisterer kun fra de sidste 100–150 år. På baggrund af en så kort måleperiode er det vanskeligt at belyse klimaets naturlige variationer. Hertil kommer, at mennesket netop inden for de sidste 150 år har påvirket miljøet som aldrig før, hvilket gør det vanskeligt at skelne mellem menneskeskabte ændringer på den ene side og naturlige klima- og miljøændringer på den anden.

For at 'eliminere' den menneskelige faktor er det derfor nødvendigt at undersøge naturlige miljø- og klimaarkiver, som kan belyse forholdene forud for menneskets påvirkning af omgivelserne. Eksempler på sådanne naturlige arkiver er sedi-

mentkerner fra bunden af søer, havbundsarkiver eller iskerner fra Grønlands indlandsis, der alle er karakteriseret ved, at der årligt afsættes nye lag. Gennem detaljerede analyser af lagenes fysiske, kemiske og biologiske parametre er det muligt at studere naturlige variationer i klimaet og deres effekter på land- og vandmiljøet og derigennem opnå viden om, hvilke processer og konsekvenser, der kan være forbundet med lignende fremtidige klimaændringer.

NEDBØRSSTIGNING 8400 ÅR FØR NU

Undersøgelser af sedimentkernen fra Højby Sø viser, at der skete markante ændringer i søens aflejringsmiljø og vandstand for ca. 8400 år siden. Det fremgår af de sedimentologiske og geokemiske analyser, at der på dette tidspunkt skete en pludselig stigning i søsedimenternes indhold af minerogent materiale (ler, silt og sand) og magnetisk susceptibilitet (udtryk for mængden af magnetiske mineraler). Stigningen i de nævnte parametre vidner om nedbørsbettinget erosion fra oplandet til søbassinet, idet menneskelig aktivitet helt kan udelukkes som årsag til erosionen, da tidspunktet ligger ca. 2500 år før landbrugets indførelse i Danmark. Den forøgede erosion stod på i minimum 250 år, fra ca. 8400–8150 år før nu. Udover erosion førte den øgede nedbør til en vandstandsstigning i søen, og herved oversvømmedes nye lavtliggende områder omkring søen, hvor vandplantevegetationen af bl.a. Stor Najade, Hornblad og Åkande har kunnet brede sig.

Bestemmelser af sedimenternes indhold af algepigmenter, dvs. de farvestoffer som giver algerne deres farve, viser en markant stigning samtidig med den forøgede erosion. Dette er her illustreret ved kurven for klorofyl *a*, der er et pigment som findes i alle alger, se side 19 øverst. Ændringer i aflejringshastigheden af algepigmenter afspejler ændringer i søens primærproduktion. Den markante stigning i klorofyl *a* fra omkring 8400 år før nu afspejler, at søen er tilført en betydelig mængde nærings-

stoffer i forbindelse med erosionen fra oplandet. Næringsstofferne har givet algerne gode vækstbetingelser og øget primærproduktionen i søen ekstraordinært meget frem til ca. 7950 år før nu, hvorefter den aftog. Som et meget væsentligt forhold viser pigmentanalyserne, at søen efter klimaændringen 8400 år før nu forblev en mere næringsrig og produktiv sø. Søens økologi ser dermed ud til at have ændret sig grundlæggende i løbet af forholdsvis kort tid som resultat af en naturlig klimaændring – et såkaldt klimabetinget økologisk regimeskifte, udløst af den øgede nedbør.

Nedbørsstigningen 8400 år før nu, der også er påvist i undersøgelser fra Sydsverige, udgør starten på en periode med en udtalt temperaturnedgang på den nordlige halvkugle centreret omkring 8200 år før nu. Den øgede nedbør og den senere afkøling er formentlig et resultat af tapningen af store smeltevandssøer i Nordamerika ud i Nordatlanten, en begivenhed der er dateret til ca. 8400 år før nu. Udledningen af de enorme mængder ferskvand (anslået 164.000 km³) dæmpede den termohaline cirkulation og dermed varmetransporten til det nordatlantiske område. Herved opstod der en stejlere temperaturgradient mellem høje og lave breddegrader i det nordatlantiske område, der som konsekvens formentlig intensiverede vestenvindsbæltet med forøget nedbør over det sydlige Skandinavien til følge.

HAVNIVEAUÆNDRINGER I TIDLIG-MIDT HOLOCÆN

Et stigende havniveau er som nævnt en af forudsigelserne i forbindelse med den nuværende globale opvarmning. Siden sidste istids maksimum – for ca. 21.000 år siden – er det globale havniveau steget med ikke mindre end 120 m, hvilket hovedsageligt skyldes afsmeltningen af de store iskapper i bl.a. Nordamerika og Skandinavien. Samspillet mellem den globale havstigning (eustasien) og landhævningen, som følge af at isen var forsvundet (isostasien), resulterede i

Topografisk kort over Nordvestsjælland med beliggenheden af de to undersøgte lokaliteter, Højby Sø (ca. 10 m over nuværende havniveau) og Tengslemark Mose (ca. 2,5 m over nuværende havniveau). Ækvidistancen er 2,5 m (topografisk data KMS G. 15-03).

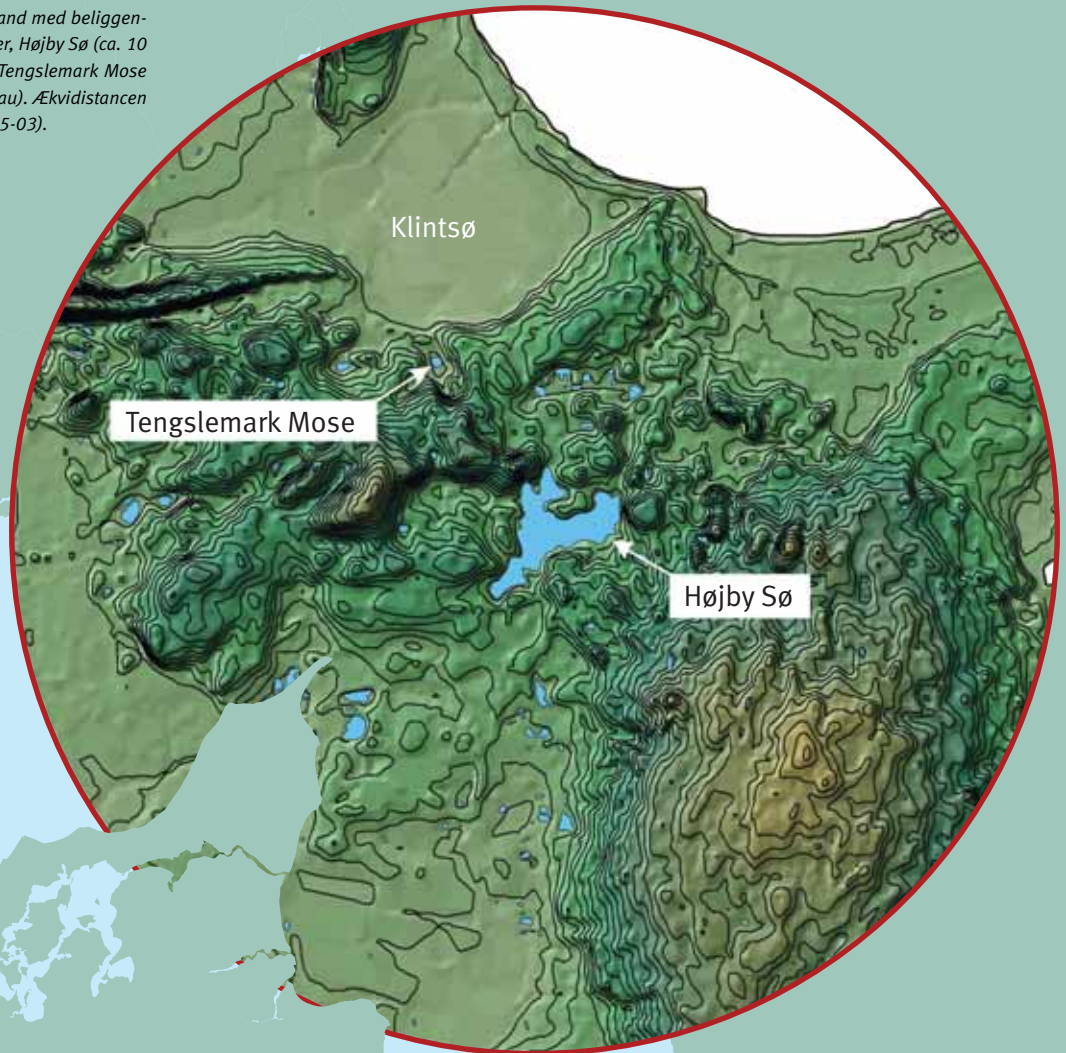


Illustration: Annabeth Andersen, GEUS, efter forfattere.

MIKKEL ULFELDT HEDE

Ph.d., IGG, Københavns Universitet
(mikkeluh@geo.ku.dk)

NANNA NOE-NYGAARD

Professor, IGG, Københavns Universitet
(nannan@geo.ku.dk)

PETER RASMUSSEN

Seniorforsker, GEUS
(per@geus.dk)

Udtagning af sedimentkerner fra bunden af Højby Sø.



Foto: Anthony Buter og Joakim Kørshøj.

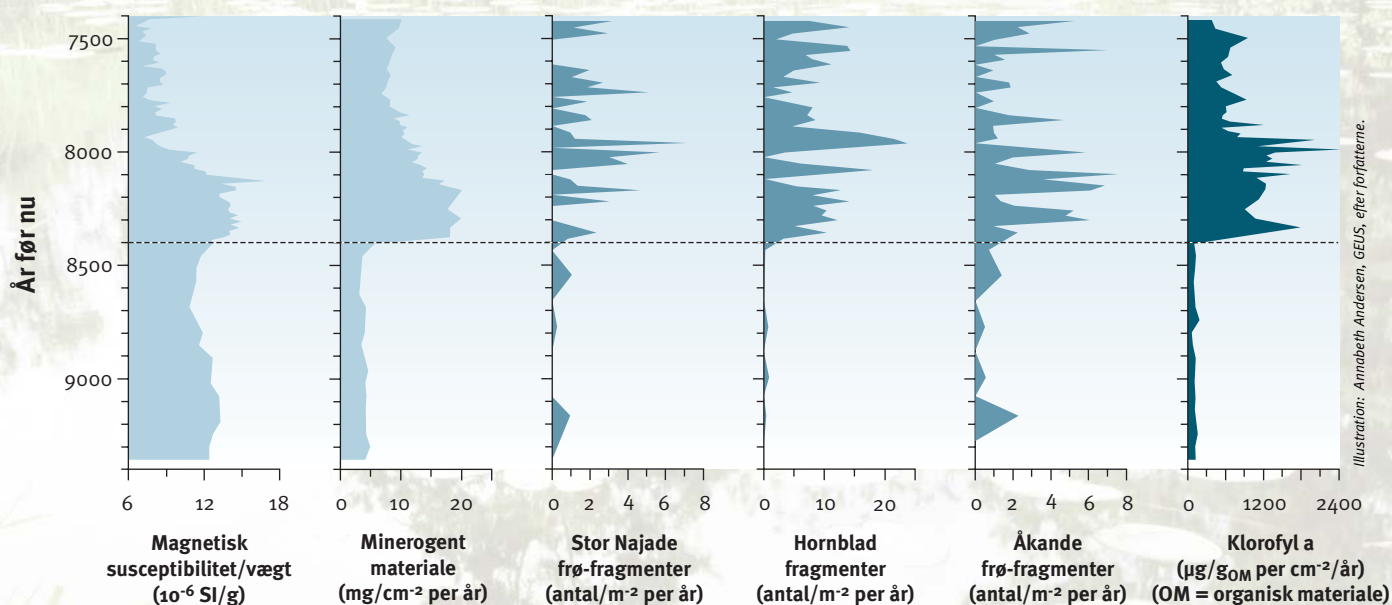


Illustration: Annabeth Andersen, GEUS, efter forfatterne.

Udvalgte fysiske, geokemiske og biologiske data fra Højby Sø for tidsrummet 9400–7400 år før nu. Ændringer i sedimenternes indhold af magnetisk susceptibilitet og minerogent materiale (ler, silt og sand) afspejler ændringer i erosion til søen; den skiftende mængde af planterester fra Stor Najade, Hornblad og Åkande fortæller om ændringer i søens vandplantevegetation og ændringer i sedimenternes indhold af algepigmentet klorofyl a vidner om ændringer i søens primærproduktion. Bemærk det markante skift i samtlige parametre ca. 8400 år før nu.

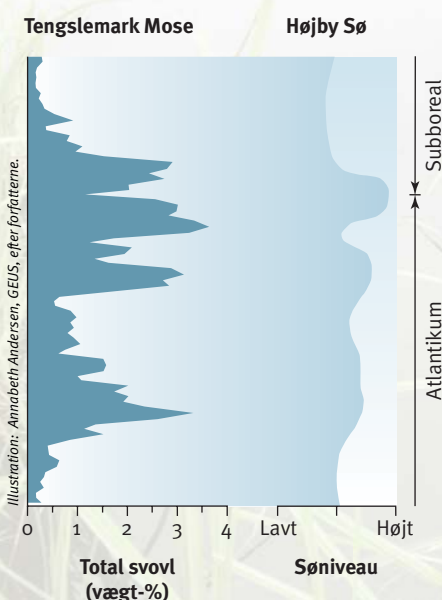


Illustration: Annabeth Andersen, GEUS, efter forfatterne.

Sammenligning mellem kurven for indholdet af total svovl i lagserien fra Tenslemark Mose og den foreløbige kurve for søniveauet i Højby Sø for perioden ca. 8000–5000 år før nu. Et højt svovlindhold i sedimenterne fra Tenslemark Mose (>2 %) afspejler perioder med et højt havniveau. Perioder med et højt havniveau udgør de såkaldte transgressioner, afbrudt af mellemliggende perioder med et relativt lavere havniveau, de såkaldte regressioner.

perioden mellem ca. 8000–5000 år før nu i en række mindre havniveauændringer i de danske farvande og Østersøen. Havniveauustigningerne, også kaldet Littorina transgressionerne, blev afbrudt af mellemliggende fald i havniveauet, kaldet regressioner.

Ved analyser af svovlindholdet i sedimentkernen fra Tenslemark Mose er der påvist fire faser med et højt svovlindhold, som er sammenfaldende med et skifte i lagenes indhold af muslinger fra ferskvandsarter til brakvands/marine arter. De fire faser repræsenterer perioder, hvor stigningen i havniveauet var hurtigere end stigningen i landhævnningen, hvilket betød, at havet kunne trænge ind over den tærskel, som adskilte Tenslemark Mose fra havet (nuværende tærskelhøjde er ca. 5 m over nuværende havniveau). Tenslemark Mose blev dermed en del af den større Klintsø brakvandsfjord. I de mellemliggende perioder, når landhævnningen var hurtigere end stigningen i havniveauet, blev Tenslemark Mose en isoleret ferskvandssø. Da havvand har et højere indhold af sulfat end ferskvand, vil sedimentet aflejret i perioder, hvor Tenslemark Mose var en del af brakvandsfjorden, have et relativt højt indhold af svovl, og når bassinet var en isoleret ferskvandssø, vil indholdet af svovl være relativt lavt. Tidsforløbet af havniveauændringerne er fastlagt ved hjælp af

kulstof-14 dateringer, og ændringerne har derefter kunnet sammenholdes med andre undersøgelser.

Foreløbige resultater fra Højby Sø (se figuren til venstre) antyder, at vandstanden i søen har ændret sig samtidig med de nævnte ændringer i havniveauet, dvs. i løbet af Midt-Sen Atlantikum og tidlig Subboreal. Fastlæggelsen af ændringerne i søniveauet i Højby Sø er baseret på variationer i lagseriens indhold af minerogent materiale, algepigmenter og magnetisk susceptibilitet. Sammenholdes undersøgelserne fra Tenslemark Mose og Højby Sø viser der sig at være en tæt tidsmæssig overensstemmelse mellem perioder i Tenslemark Mose med et højt svovlindhold i sedimenterne, svarende til perioder med et højt havniveau, og perioder med et højt søniveau i Højby Sø. Dette indikerer, at havniveauustigningerne for 8000–5000 år siden efter alt at dømme har påvirket grundvandsstanden og dermed søniveauet i Højby Sø. Dette er bemærkelsesværdigt i betragtning af, at søen ligger ca. 1,5 km længere inde i land end Tenslemark Mose og ca. 10 m højere. Med disse – om end foreløbige – resultater fra Tenslemark Mose og Højby Sø, må det forudses, at en fremtidig havniveauustigning vil få betydelig indflydelse på grundvandsressourcerne i mange danske kystnære områder.



Foto: Peter Warno-Moors, GEUS.

DANMARK

PP

Magasinpost UMM
ID-nr. 46439

GEOCENTER DANMARK

GEOCENTER DANMARK

Er et formaliseret samarbejde mellem de fire selvstændige institutioner De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Geologisk Institut ved Aarhus Universitet samt Institut for Geografi og Geologi og Geologisk Museum begge ved Københavns Universitet. Geocenter Danmark er et center for geovidenskabelig forskning, uddannelse, rådgivning, innovation og formidling på højt internationalt niveau.

UDGIVER

Geocenter Danmark.

REDAKTION

Geoviden – Geologi og Geografi redigeres af Seniorforsker Merete Binderup (ansvarshavende) fra GEUS i samarbejde med en redaktionsgruppe.

Geoviden – Geologi og Geografi udkommer fire gange om året og abonnement er gratis. Det kan bestilles ved henvendelse til Finn Preben Johansen, tlf.: 38 14 29 31, e-mail: fpj@geus.dk og på www.geocenter.dk, hvor man også kan læse den elektroniske udgave af bladet.

ISSN 1604-6935 (papir)

ISSN 1604-8172 (elektronisk)



Produktion: Annabeth Andersen, GEUS.

Tryk: Schultz Grafisk A/S.

Forsidebillede: Grusgrav syd for Nymølle ved Lynge.

Foto: Peter Warno-Moors, GEUS.

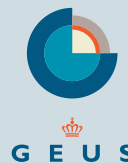
Reprografisk arbejde: Benny Schark, GEUS.

Illustrationer: Forfattere og Grafisk, GEUS.

Eftertryk er tilladt med kildeangivelse.

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND (GEUS)

Øster Voldgade 10
1350 København K
Tlf: 38 14 20 00
E-mail: geus@geus.dk



INSTITUT FOR GEOGRAFI OG GEOLOGI

Øster Voldgade 10
1350 København K
Tlf: 35 32 25 00
E-mail: info@geo.ku.dk

GEOLOGISK MUSEUM

Øster Voldgade 5-7
1350 København K
Tlf: 35 32 23 45
E-mail: rcp@snm.ku.dk



GEOLOGISK INSTITUT

Høegh-Guldbergs Gade 2, B.1670
8000 Århus C
Tlf: 89 42 94 00
E-mail: geologi@au.dk



PortoService, Postboks 9490, 9490 Pandrup